

PERANCANGAN SISTEM PENGONTROLAN LEVEL PADA STEAM DRUM WASTE HEAT BOILER BERBASIS ADAPTIVE NETWORK FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS)

Theresia Yuliati¹⁾
E-mail: yulia@mail.wima.ac.id

ABSTRAK

Unit boiler sangatlah penting pada industri pupuk seperti di PT. Petrokimia Gresik, khususnya dalam produksi steam. Kualitas steam yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh aliran gas buang panas yang dihasilkan dari pembakaran di dalam turbin gas dan juga dipengaruhi oleh level dari drum itu sendiri. Untuk bisa menghasilkan kualitas steam yang baik, maka berbagai parameter di dalamnya harus dapat dikontrol dengan baik, mengingat karakteristik dinamikanya yang sering berubah menyesuaikan beban proses yang ada. Salah satu komponen kontrol yang penting adalah High Pressure Steam Drum (HP drum). Parameter kontrol yang harus dijaga dengan baik adalah level air pada steam drum.

Oleh karena itu dalam penelitian ini, dengan memperhatikan struktur agar tidak terlalu mengganggu sistem yang telah ada, maka ditawarkan solusinya menggunakan kontrol adaptif yaitu dengan merancang suatu sistem pengontrolan level pada steam drum waste heat boiler berbasis neuro fuzzy jenis Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS).

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian, maka dapat diambil kesimpulan bahwa pemodelan sistem berbasis pada neuro fuzzy dengan 3 masukan, 1 keluaran serta model dinamika invers plant pada HP steam drum telah menunjukkan hasil yang cukup baik. Selain itu performansi pengontrol neuro fuzzy dalam kecepatan beradaptasi dan kemampuan belajar cukup baik dalam mengejar set point.

Kata kunci : waste heat boiler, pengontrol level, ANFIS, performansi

PENDAHULUAN

Dalam upaya menghasilkan steam yang diperlukan untuk industri proses khususnya di PT. Petrokimia Gresik, maka waste heat boiler (WHB) memegang peranan yang sangat penting. Steam yang dihasilkan tersebut harus memenuhi kualitas yang diinginkan, baik dalam hal tekanan, suhu, kemurnian dan lain-lain. Steam yang dihasilkan akan dimanfaatkan untuk keperluan proses maupun untuk menggerakkan mesin-mesin putar tenaga uap (steam turbine). Kualitas steam yang kurang bagus akan berpotensi merusak mesin-mesin putar tersebut.

Sistem boiler merupakan sistem pembangkit uap panas (steam generator) yang memanfaatkan energi perpindahan panas dari hasil pembakaran untuk mengubah air menjadi produk utama berupa steam. Dua jenis pembangkit daya yaitu berupa turbin gas, dan turbin steam atau dikenal sebagai Combined Cycle (CC), maupun Combined Heat Power (CHP) menghasilkan energi listrik dan panas. Oleh sebab itu boiler dibedakan dalam dua tipe, yaitu:

1. Boiler dengan pembakar (fired boiler) yang digunakan pada sistem pembangkit daya dengan turbin steam;
2. Boiler tanpa pembakar (unfired boiler atau Heat Recovery Steam Generation/HRSG) yang berfungsi sebagai penukar panas (heat

exchanger) untuk mengubah gas panas dan air menjadi steam. Prinsip kerja dari HRSG sama dengan kondisi riil di PT. Petrokimia Gresik yang di kondisi lapangan sering dikenal sebagai Waste Heat Boiler (WHB).

Karakteristik serta sirkulasi operasi kedua jenis boiler tersebut pada prinsipnya sama yaitu menghasilkan steam dari air dengan memanfaatkan energi panas. Keduanya mempunyai kehandalan (reliability) operasi serta perpindahan panas maksimum yang memegang peranan penting, dan sifatnya kritis terhadap perubahan suhu gas.

Salah satu parameter operasi boiler yang harus dijaga dengan baik adalah level/ketinggian permukaan air dalam HP drum. Untuk boiler dengan kapasitas besar, pengontrolan level steam drum dikenal dengan istilah tiga (three) elemen dan satu (single) elemen level control. Single element level control akan difungsikan pada saat produksi steam masih di bawah 30%, dan begitu lebih besar daripada 30%, maka sistem kontrol level secara otomatis pindah ke three elemen level control. Pada single element, level semata-mata dikontrol oleh level air pada steam drum, sedang pada three element, di mana parameter proses dikontrol adalah kombinasi dari level air pada steam drum, laju aliran steam yang dihasilkan, dan tekanan steam yang dihasilkan.

¹⁾ Staf Pengajar di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya

WHB merupakan tipe *boiler* yang memanfaatkan aliran gas buang dari turbin gas yang masih memiliki suhu tinggi. Sekitar 60% dari 70% panas yang dihasilkan oleh pembakaran di dalam turbin gas dimanfaatkan kembali oleh *WHB* untuk membantu menghasilkan *steam*.

Besar/kualitas *steam* yang dihasilkan baik itu suhu, tekanan maupun laju aliran *steam* sangat dipengaruhi oleh aliran gas buang panas yang dihasilkan dari pembakaran di dalam turbin gas. Di samping itu, *steam* yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh level dari drum itu sendiri. Untuk bisa dihasilkan *steam* dengan kualitas yang baik tersebut, maka berbagai parameter di dalamnya harus dapat dikontrol dengan baik, mengingat karakteristik dinamikanya yang sering berubah menyesuaikan beban proses yang ada. Salah satu komponen kontrol yang penting adalah *High Pressure Steam Drum (HP Drum)*. Parameter kontrol yang harus dijaga dengan baik adalah level air pada *steam drum* tersebut yang harus selalu dijaga pada ketinggian tertentu. Apabila terlalu tinggi, maka *steam* akan basah sehingga berpotensi merusak peralatan-peralatan yang menggunakan *steam* tersebut, seperti *steam turbine* dan lain-lainnya. Sebaliknya apabila terlalu rendah, maka *tube-tube* dari *boiler* yang bersangkutan akan menjadi *over heated* sehingga umur *boiler* menjadi singkat.

Pada saat ini, sistem yang digunakan di PT. Petrokimia Gresik menggunakan algoritma klasik *Proportional Integral Derivative (PID) Control* yang diimplementasikan pada sistem kontrol terdistribusi yang tidak mempunyai kemampuan melakukan *auto tuning*. Keberhasilan pemakaian algoritma tersebut sangat tergantung seberapa baik hasil *tuning* parameter pengontrol, yang umumnya dilakukan dengan metoda coba-coba (*trial error*).

Teknik pengontrol klasik P , PI , dan PID telah menjadi basis dalam sistem kontrol yang sederhana, dan implementasinya memang telah begitu meluas dalam berbagai industri. Namun, teknik pengontrol klasik ini tidak mampu mengkompensasi perubahan parameter yang terjadi di dalam *plant*, dan tidak dapat beradaptasi terhadap perubahan lingkungannya, di samping itu terdapat kendala pada *tuning* parameter-parameter pengontrolnya yang masih manual, sehingga sangat tergantung dari pengetahuan, dan pengalaman operator serta masih sedikitnya penggunaan pengontrol yang *well tuned*. Di lain pihak, dalam teknik kontrol

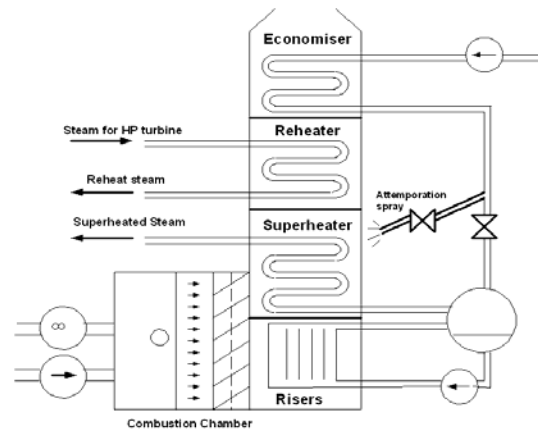
konvensional, model matematika *plant*, dan *tuning* parameter pengontrol harus ditentukan sebelum mengimplementasikan pengontrolnya.

Oleh sebab itu dalam penelitian ini, dengan memperhatikan struktur agar tidak terlalu mengganggu sistem yang telah ada, maka ditawarkan solusinya menggunakan kontrol adaptif yaitu dengan merancang suatu sistem pengontrolan level pada *steam drum waste heat boiler* berbasis *neuro fuzzy* jenis *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)*.

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem Waste Heat Boiler

Produk utama unit proses *boiler* di PT. Petrokimia Gresik yang berupa *steam* ini pada proses selanjutnya dipakai pada unit proses amonia, dan urea. Adapun skema sistem *boiler* secara umum dapat disajikan pada Gambar 1 di mana terdiri dari beberapa sub sistem yang antara lain berhubungan dengan: air (*feedwater, drum*), *steam (drum, superheater)*, *combustion chamber*, *waterwalls (risers)*, *reheater*, dan *economizer*. Hal ini berakibat terdapatnya beberapa variabel yang berpengaruh secara internal, dan hanya digunakan di dalam *loop* kontrol lokal (misalnya: level air di *drum*, suhu, dan tekanan *steam boiler*, serta tekanan udara di ruang bakar (*furnace*)).

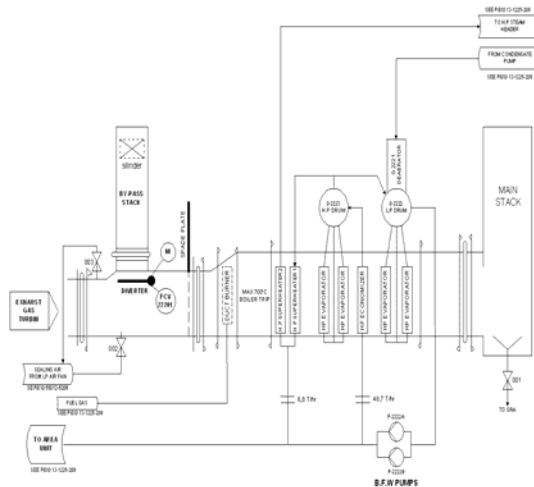


Gambar 1. Skema Umum Sistem *Boiler*

Dari skema umum sebagaimana yang disajikan pada Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa *boiler feedwater* dialirkan ke *drum* di mana di dalam *drum* tersebut terjadi evaporasi air. Air kemudian mengalir ke dalam *downcomers*, dan masuk ke *risers*. Di dalam *risers* panas dari pembakaran digunakan untuk menaikkan suhu air yang berakibat akan terjadi evaporasi dari air. Jadi sirkulasi air, *steam*, serta

campuran air dan *steam* terjadi di dalam *drum*, *downcomers*, dan *risers*. *Steam* yang dibuat di dalam *risers* kemudian dipisahkan di dalam *drum* dari *steam* yang mengalir melalui *superheater* yang berasal dari *HP turbine*. Hal ini kemudian di-*recycle* ke *reboiler* (terlebih dahulu ke dalam *reheater*) di mana energinya dinaikkan. Adapun *desuperheating spray water* di dalam *superheater* digunakan untuk mengontrol suhu *steam*. *Risers* menyerap panas di dalam pembakaran. Perpindahan panas gas hasil pembakaran dengan cara radiasi, dan konveksi ke *superheater*. Kemudian panas tersebut ditransfer dengan konveksi ke *reheater*, dan akhirnya ke *economiser* sebelum ke luar *boiler* melalui *stack*.

Sistem *boiler* yang ada di PT. Petrokimia Gresik merupakan sistem *boiler* tipe *Waste Heat Boiler (WHB)* yang memanfaatkan energi panas gas buangan (*exhaust gas*) dari turbin gas. Proses ini bertujuan untuk memanaskan *feedwater* pada *superheater*, sehingga menghasilkan laju aliran *steam*. Diagram Proses sistem *WHB* (berdasarkan *Piping & Instrument Diagram (P&ID) Exhaust Gas* PT. Petrokimia-Gresik No. 55012/6200) dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema P&ID (Exhaust Gas Sistem Waste Heat Boiler)

Pada kondisi operasi normal, aliran gas buang akan dialihkan langsung menuju ke *WHB*, namun ketika hanya turbin gas yang beroperasi, maka katup pengalih (*diverter*) akan mengalihkan gas buang tersebut menuju *bypass stack* untuk dibuang ke udara. Peran dari pembakar (*duct burner*) sangat penting untuk mempertahankan aliran panas dengan cara mengatur suhu yang masuk ke *boiler* agar kondisi *steam* yang diproduksi baik berupa suhu, laju aliran, maupun tekanan dapat terjaga

pada kondisi tertentu. Selain gas buangan dari turbin gas, masukan utama yang dikontrol ke sistem *boiler* adalah air umpan *boiler* (*feedwater*) disebut juga *Boiler Feed Water (BFW)*. *BFW* akan masuk ke sistem *WHB* melalui pompa kondensat P2221A/B, dan menuju ke *Low Pressure drum (LP drum)* melalui *deaerator*. *LP drum* ini juga terhubung dengan *LP evaporator* yang berperan untuk menaikkan suhu air di dalam *drum*, sehingga air menguap menjadi *steam*.

Proses sirkulasi antara *LP drum*, dan *LP evaporator* akan berlangsung secara internal, dan berulang sehingga *steam* yang dihasilkan dari *BFW* di dalam *deaerator* akan menuju pada suhu jenuhnya. Namun, ketika suhu jenuhnya masih belum tercapai untuk menghasilkan *steam* pada *LP drum*, maka diperlukan masukan *steam* tambahan yang berasal dari *High Pressure drum (HP drum)*. *Steam* pada *LP drum* yang telah mencapai titik jenuhnya akan meninggalkan *drum*, dan dipompakan kembali oleh pompa *BFW* P2222 A/B menuju *economizer*. Kondisi yang sama seperti pada *LP drum*, maka *HP drum* ini juga terhubung dengan *High Pressure (HP) evaporator* yang mempunyai fungsi yang sama. Selanjutnya *steam* pada *HP drum* ini akan menuju *superheater* untuk terus dipanaskan, sehingga mencapai suhu *steam* yang diinginkan, dan juga menjadi keluaran dari sistem *WHB* selain aliran dan tekanan *steam*.

Sebagai catatan bahwa suhu keluaran dari *steam* akan dikontrol pada suhu acuan 460°C dengan menginjeksi kembali ke *superheater*. Berdasarkan referensi sistem manual operasi *WHB* PT. Petrokimia Gresik^[1], sistem *WHB* ini terdiri dari beberapa sub sistem, yaitu *Superheater*, *Evaporator* tekanan tinggi (*High Pressure Evaporator*) dan *Evaporator* tekanan rendah (*Low Pressure Evaporator*), *Economizer*, *Lower Header*, *LP/HP Downcomers*, *Drum*, Saluran pipa *Ducting*), Ruang pembakar (*Firing Room*), dan Pembungkus *Boiler* (*Casing*).

Kondisi Operasi Sistem WHB

Loop proses kontrol sistem *WHB* beroperasi pada dua kondisi baik secara manual maupun otomatis. Secara manual apabila sinyal kontrol tidak berasal dari kalkulasi pengontrol, tetapi langsung berasal dari perintah operator di lapangan. *Loop* proses ini dapat dianggap sebagai suatu proses *loop* terbuka (*open loop system*). Sebaliknya apabila operasi dilakukan secara otomatis, maka sinyal kontrol yang diberikan oleh pengontrol dirancang dengan

suatu unjuk kerja tertentu. Sebagian besar pengontrol di lapangan pada sistem WHB menggunakan pengontrol *PID*, dan merupakan sistem kontrol *loop* tertutup (*closed loop system*).

Selama beroperasi, agar *steam* bisa dihasilkan dengan kualitas yang baik, maka berbagai parameter di dalamnya harus dapat dikontrol dengan baik, mengingat karakteristik dinamikanya yang sering berubah menyesuaikan beban proses yang ada. Salah satu komponen kontrol yang penting adalah pengontrolan level air pada *High Pressure steam drum (HP drum)* yang harus tetap terjaga pada batas normalnya, dan harus dipastikan bahwa level tersebut tidak berada pada batas level terendah (minimum 30% level) daerah aman operasi. Hal ini untuk menghindari terjadinya *tube* dari *boiler* yang bersangkutan menjadi *over heated* sehingga umur *boiler* menjadi lebih singkat. Sebaliknya, apabila level air terlalu tinggi (maksimum 80% level), maka *steam* akan basah sehingga berpotensi merusak peralatan-peralatan yang menggunakan *steam* tersebut, seperti: *steam turbine* dan sebagainya.

Kondisi aman lain yang harus tetap dijaga adalah tekanan *steam* untuk mencegah terjadinya hal-hal yang tidak diinginkan selama proses berlangsung yang diakibatkan oleh tekanan maksimum. Oleh sebab itu perancangan sistem *interlock* sebagaimana tertera pada Tabel 1 dilakukan untuk mengantisipasi hal-hal yang tidak diinginkan tersebut. Prosedurnya dilakukan secara bertahap dimulai dari pengecekan, dan pengujian sistem secara interval regulasi sampai dengan

Tabel 1. Perancangan *Trip* pada Sistem Pembakar, *Boiler*, dan Turbin Gas

<i>Boiler*</i>	Pembakar
Terjadi <i>Trip</i> apabila:	
<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan <i>steam high high</i> • Suhu <i>steam high high</i> • Level pada <i>LP drum low low (2x)</i> • Level pada <i>HP drum low low (2x)</i> • Suhu ruang bakar <i>high high</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan <i>steam high high</i> • Suhu <i>steam high high</i> • Level pada <i>LP drum low low (2x)</i> • Level pada <i>HP drum low low (2x)</i> • Suhu ruang bakar <i>high high</i> • Tekanan udara dari kipas bertekanan rendah <i>low low</i>

Ket : * indikasi *trip* terjadi dan diikuti dengan penutupan *diverter valve*

** indikasi *trip* terjadi diikuti dengan tidak menutupnya *diverter valve* dalam 60 detik

dikeluarkannya indikasi tanda bahaya. Apabila keadaan memburuk, dan membahayakan, maka sistem otomatis akan *shutdown*. Dalam hal *boiler* kondisi *unhealthy* (salah satu peralatan pengaman *boiler* memberikan sinyal *trip*) dan *diverter* tidak mau menutup, maka *turbine gas* akan secara otomatis *shut down*.

Model *Neuro Fuzzy*

Pada perancangan sistem kontrol berbasis pada pemodelan sistem (*model based control*) tentunya diperlukan suatu model yang bisa merepresentasikan dinamika suatu proses. Khusus untuk model yang mempunyai karakteristik non linier, maka dalam perancangan sistem kontrolnya diperlukan penentuan struktur modelnya terlebih dahulu, dan biasanya struktur model dari proses tidak diketahui. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode pendekatan dalam menentukan struktur modelnya. Dalam hal ini akan dilakukan pendekatan dengan menggunakan teknik identifikasi sistem yang merupakan salah satu dari sekian banyak metode pemodelan sistem berdasarkan pada data masukan dan keluaran proses (*plant*).

Pemodelan berbasis model *Neuro fuzzy Nonlinear Auto Regressive with eXogeneous input (NARX)* merupakan suatu model yang menyatakan bagaimana hubungan antara masukan keluaran sebelumnya dengan keluaran prediksinya. Secara umum model *NARX* dinyatakan dalam bentuk persamaan:

$$y_m(k+1) = F(y(k), \dots, y(k-n_a+1), u(k), u(k-n_b+1)) \quad (1)$$

dengan:

$y(k), \dots, y(k-n_a+1)$ dan

$u(k), \dots, u(k-n_b+1)$ berturut-turut adalah keluaran dan masukan proses sebelumnya, $y_m(k+1)$ merupakan keluaran prediksi proses, n_a, n_b adalah dinamika order dari proses, dan F adalah fungsi nonlinier.

Dengan demikian dalam hal ini, pemilihan model dan penentuan parameter model sangat mempengaruhi perhitungan keluaran prediksinya, dan pada tahap selanjutnya berperan pada perancangan pengontrolnya.

Metode *neuro fuzzy*, merupakan kolaborasi antara algoritma pembelajaran dari Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dengan teori Logika *Fuzzy*. Algoritma JST digunakan untuk menentukan parameter-parameter dari sistem inferensi *fuzzy*. Selanjutnya, pada penelitian ini

digunakan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang merupakan suatu arsitektur jaringan yang secara fungsional ekuivalen dengan kaidah/aturan fuzzy tipe Takagi Sugeno-Kang (TSK), dan basis fungsi pada JST dengan algoritma pembelajaran (*learning*) berdasarkan pada data pelatihan. Kelebihan dari sistem fuzzy Sugeno adalah cara perhitungan yang lebih sederhana, transparan, dan efisien serta lebih memudahkan dalam pekerjaan komputasi dibandingkan dengan sistem fuzzy model Mamdani^[2].

Arsitektur ANFIS^[2,3,4,5]

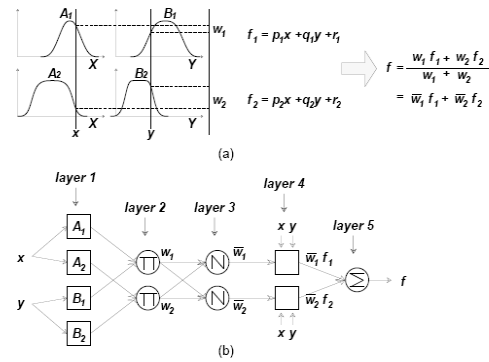
Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) adalah suatu jaringan adaptif berbasis pada sistem inferensi fuzzy. Parameter ANFIS terdiri dari dua bagian, yaitu parameter *premise* (nonlinier), dan parameter konsekuensi (linier) yang dapat diadaptasikan dengan pembelajaran *hybrid* yang menggabungkan dua metode pembelajaran yaitu metode kuadrat terkecil (*least square estimator*), dan metode penurunan gradien (*steepest descent*). Dalam hal ini, penentuan jumlah, tipe, dan parameter dari fungsi keanggotaan (*membership function*) beserta aturan-aturannya memegang peranan yang sangat penting dalam mencapai performansi yang diinginkan, namun seringkali sulit untuk dilakukan. Bahkan selama ini, hanya berdasarkan *trial and error*, padahal hal ini yang sangat penting dalam *tuning* sistem fuzzy.

Model ANFIS dari fuzzy Sugeno (sebagaimana disajikan pada Gambar 3) yang diambil dari jaringan yang adaptif untuk kerangka pembelajaran, dan adaptasi. Dengan mempertimbangkan kesederhanaan, dan kemudahan komputasi, maka sistem inferensi fuzzy yang digunakan adalah sistem fuzzy model TSK orde satu. Untuk arsitektur ANFIS, misalkan model Sugeno orde satu dengan dua masukan dengan dua aturan (*rules*) serta satu keluaran dapat dinyatakan dalam bentuk:

Aturan I : Jika (x adalah A_1) dan (y adalah B_1), maka ($f_1 = p_1x + q_1y + r_1$)

Aturan II : Jika (x adalah A_2) dan (y adalah B_2), maka ($f_2 = p_2x + q_2y + r_2$)

Secara umum, struktur jaringannya mengadaptasi parameter nonlinier pada lapisan 1, dan parameter linier pada lapisan 4. Keseluruhan arsitektur ANFIS mempunyai lima lapisan dengan fungsi yang berbeda-beda. O_{Li} adalah simbol untuk keluaran dari node i dalam lapisan L . Kelima lapisan pada arsitektur ANFIS dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 3. (a). Mekanisme Sistem Inferensi Fuzzy Model Sugeno

(b). Arsitektur ANFIS TSK orde satu dengan dua masukan dan satu keluaran^[2]

Lapisan 1:

Semua *node* dalam lapisan ini adalah *adaptive nodes*, i merupakan derajat keanggotaan dari masukan terhadap fungsi keanggotaan fuzzy (*membership function = MF*) yang dinyatakan dalam *node*:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i=1,2 \quad (2)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i=3,4$$

A_i , dan B_i merupakan himpunan fuzzy dalam bentuk parameter. Misal MF adalah fungsi *generalized bell* (*gbell*) dengan persamaan

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}, \quad i=1,2 \quad (3)$$

dengan: a_i, b_i , dan c_i merupakan parameter dari MF . Semua nilai dari parameter-parameter di lapisan ini akan berubah sesuai dengan fungsi *gbell* yang dipilih sebagai fungsi keanggotaan untuk setiap masukan himpunan fuzzy-nya. Parameter di lapisan ini disebut sebagai parameter *premise*.

Lapisan 2:

Node-node dalam lapisan ini merupakan *node* tetap (tidak adaptif). Keluaran dari *node* ini adalah:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad i=1,2 \quad (4)$$

Keluaran dari setiap *node* dalam lapisan ini menyatakan *firing strength* dari aturannya.

Lapisan 3:

Node-node dalam lapisan ini juga merupakan *fixed node*. *Node* ini merupakan normalisasi dari lapisan sebelumnya. Keluaran dari lapisan ini dinyatakan dalam persamaan:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1,2 \quad (5)$$

Lapisan 4:

Semua *node* dalam lapisan ini merupakan *adaptive node*. Keluaran dari setiap *node* merupakan perkalian dari normalisasi *firing strength*-nya dengan polinomial orde satu:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i=1,2 \quad (6)$$

dengan: p_i , q_i , dan r_i merupakan parameter linier atau parameter konsekuen dari aturan fuzzy (*consequent parameters*).

Lapisan 5:

Lapisan ini hanya terdiri dari satu *node*. Keluaran dari lapisan ini adalah:

$$O_{i,5} = f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad i=1,2 \quad (7)$$

Adapun ringkasan keseluruhan tahap proses pembelajaran *hybrid* dapat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Proses Pembelajaran *Hybrid* pada ANFIS

Keterangan	Arah maju	Arah mundur
Parameter premis	Tetap	<i>Gradient descent</i>
Parameter konsekuen	<i>Least Square Estimate</i>	Tetap
Sinyal	Keluaran <i>node</i>	Sinyal <i>error</i>

Pengontrol Neuro Fuzzy^[3,4]

Secara umum sistem kontrol *time invariant* dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (\text{dinamic plant}) \quad (8)$$

$$u(t) = g(x(t)) \quad (\text{pengontrol})$$

Tujuan dari pengontrol adalah untuk menentukan fungsi pengontrol $g(\cdot)$ sedemikian sehingga *state plant* $x(t)$ mengikuti sedekat mungkin trayektori $x_d(t)$ yang diinginkan. Adapun blok diagram sistem kontrol umpan balik sistem waktu diskrit dapat disajikan pada Gambar 4 atau dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan:

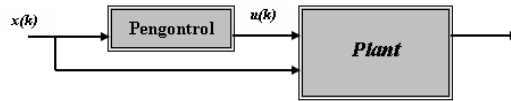
$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (\text{plant}) \quad (9)$$

$$u(k) = g(x(k)) \quad (\text{pengontrol})$$

dengan:

$x(k+1)$ dan $x(k)$ berturut-turut merupakan keluaran *state* pada saat $k+1$ dan k dan $u(k)$ sinyal kontrol pada k .

Permasalahan utama dalam merancang sistem kontrol adalah menentukan aksi kontrol u sebagai fungsi dari keluaran *plant* x untuk mencapai *set point* yang diinginkan. Ada beberapa metode perancangan pengontrol yang berhubungan dengan pengontrol *neuro fuzzy*, dan salah satu di antaranya yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *neuro fuzzy* dengan dinamika *inverse* sebagai pengontrol (*invers control*).



Gambar 4. Blok Diagram Sistem Kontrol Umpan Balik Sistem Waktu Diskrit

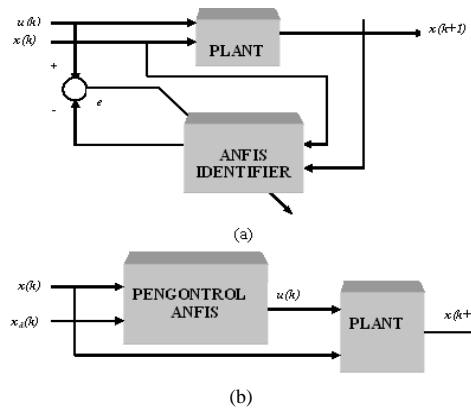
Tahap pembelajaran *inverse plant* untuk merancang pengontrol berbasis *neuro fuzzy* dilakukan dalam dua tahap secara bersamaan, sehingga sesuai dengan metode adaptif kontrol klasik. Tahap pertama merupakan tahap pembelajaran, di mana teknik secara *on line* maupun *off line* dilakukan untuk memodelkan dinamika *inverse* dari *plant*. Selanjutnya, model *neuro fuzzy* yang diperoleh merepresentasikan dinamika *inverse* dari *plant*, kemudian digunakan untuk membangkitkan aksi kontrol dalam tahap aplikasi. Adapun blok diagram untuk metode *invers control* ini dapat disajikan pada Gambar 5. Misalkan *plant* berorde n dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (9). Misalkan dipilih pada *state* $k+2$, maka berlaku bahwa:

$$x(k+2) = f(x(k+1), u(k+1)) \quad (10)$$

$$= f(x(k), u(k), u(k+1))$$

Secara umum untuk *plant* berorde n dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$x(k+n) = F(x(k), \bar{U}) \quad (11)$$



Gambar 5. Blok Diagram Metode *Inverse* Kontrol
(a). Tahap Pembelajaran, (b). Tahap Aplikasi

dengan: n adalah orde *plant*, F sebagai fungsi komposit berulang, dan \bar{U} merupakan aksi kontrol pada k sampai dengan $k+n-1$. Dengan asumsi bahwa *plant* bersifat dinamika *inverse*, \bar{U} dapat dinyatakan sebagai:

$$\bar{U} = G(x(k), x(k+n)) \quad (12)$$

dengan G merupakan dinamika *inverse plant*. Proses pembelajaran *neuro fuzzy* menggunakan $3n$ data input $[x(k)^T, x(k+1)^T]$ sesuai data pelatihan yaitu keluaran *plant* pada k dan $k+1$ sesuai data pelatihan dan n keluaran data $[\bar{U}^T]$ sesuai data pelatihan. Selanjutnya, selisih antara aksi kontrol sebenarnya dengan aksi kontrol prediksi digunakan untuk menala parameter premis, dan konsekuen pada *ANFIS* sehingga diperoleh nilai *error* yang minimum. Setelah proses pembelajaran, maka kaidah aturan berdasarkan sistem *neuro fuzzy* akan mengikuti kaidah aturan model Takagi Sugeno Kang order satu yaitu:

Jika $x(k)$ adalah A^l dan $x(k+1)$ adalah B^l , maka $u^l = a^l x(k) + b^l x(k+1) + c^l$

dengan $l = 1, 2, 3, \dots, M$, A^l, B^l merupakan himpunan *fuzzy*, dan a^l, b^l, c^l parameter-parameter konsekuen. Jika pengontrol *neuro fuzzy* sesuai dengan dinamika *inverse G*, maka apabila diberikan masukan $x(k)$, dan *set point* $x_d(k+n)$, pengontrol akan membangkitkan aksi kontrol berupa:

$$\hat{U} = \hat{G}(x(k), x_d(k+n)) \quad (13)$$

Setelah langkah ke n , maka sekuens kontrol akan membuat nilai keluaran *plant* $x(k)$ menyamai nilai *set point* $x_d(k+n)$ yang telah ditentukan.

METODE PENELITIAN

Pelaksanaan desain eksperimen ini menyangkut industri proses yang sangat penting di industri pupuk pada PT. Petrokimia Gresik yang bertujuan meningkatkan performansi, dan unjuk kerja dari proses *Waste Heat Boiler* (WHB). Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan simulasi yang divalidasi oleh data pengukuran nyata, dan tidak langsung berhubungan dengan proses yang sedang berjalan untuk menghindari resiko yang sangat mahal, baik dari segi keamanan, keselamatan, maupun biaya. Adapun pendekatan penelitian yang dimaksud adalah:

1. Sebagai studi pendahuluan dalam penelitian ini adalah telah dilakukan survei informasi

untuk memperoleh landasan teori dan eksperimen baik melalui studi pustaka maupun survei langsung ke lapangan. Melalui studi pustaka ini akan diperoleh informasi tentang mekanisme serta model proses yang menjadi subyek penelitian, yaitu *steam drum waste heat boiler*;

2. Perancangan eksperimen dan pengambilan data sebagai awal rangkaian proses identifikasi. Eksperimen, dan pengambilan data dilakukan di sistem WHB selama kurang lebih satu bulan. Langkah-langkah persiapan yang telah dilakukan baik persiapan bahan maupun instrumentasi dalam penelitian ini adalah:

- a. Kalibrasi empat buah instrument level, suhu, aliran, dan tekanan sebagai instrumentasi penelitian dalam mendapatkan variable-variabel pengukuran yang diperlukan untuk memperoleh data baik masukan maupun gangguan terukur, dan tak terukur yang mempengaruhi keluaran sistem;
- b. Melakukan simulasi gangguan operasi *boiler* dengan bantuan operator pabrik untuk mendapatkan data percobaan;
- c. Pengambilan data sistem WHB yang diambil secara langsung dari alat dan *software Plant Historical Data (PHD)*;

Pelaksanaan desain eksperimen di sistem WHB PT. Petrokimia Gresik dilakukan dengan sangat hati-hati dengan mempertimbangkan banyak faktor seperti: keamanan (*safety*), keselamatan, biaya, ketersediaan alat ukur di setiap variabel pengukuran di *plant*, keterbatasan, dan kendala pada daerah operasi pengukuran, serta interaksi setiap variabel masukan, dan gangguan yang akan mempengaruhi variabel keluaran sistem. Hal ini dimaksudkan agar data yang akan digunakan memiliki hubungan secara langsung baik masukan, maupun gangguan terukur, dan tak terukur yang mempengaruhi keluaran sistem. Perancangan eksperimen juga dapat menggambarkan bagaimana interaksi *loop* kontrol secara riil di lapangan. Hal lain yang harus diperhatikan dalam membangun blok sistem eksperimen, dan pengambilan data di *plant* adalah bagaimana hubungan *loop* kontrol tersebut terhadap variabel-variabel dari sistem yang akan diidentifikasi. Sistem WHB di PT. Petrokimia Gresik merupakan sistem dengan siklus *loop* tertutup, di mana semua

- proses dikontrol pada nilai yang telah ditetapkan;
3. Membangun model sistem *WHB* berdasarkan data yang diperoleh baik dari studi pustaka maupun dari data pengukuran di lapangan melalui pendekatan model *NARX* berbasis *ANFIS*;
 4. Berdasarkan hasil pemodelan sistem yang telah diperoleh, maka akan dirancang sistem pengontrolan level air berbasis *ANFIS*;
 5. Eksperimen, dan simulasi sistem pengontrolan *level* yang telah dibangun serta melakukan validasi dengan data pengukuran di lapangan;
 6. Analisis hasil eksperimen dan simulasi.

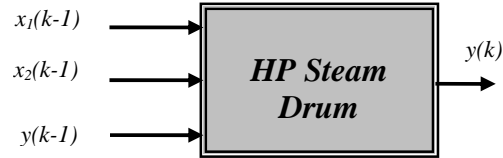
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Struktur Model *ANFIS* yang Digunakan dalam Identifikasi Sistem

Istilah model dapat diartikan sebagai cara untuk merepresentasikan hubungan dari masing-masing variabel seperti: variabel masukan (*input*), dan variabel keluaran (*output*) dari suatu sistem. Hal ini dapat juga diartikan sebagai cara untuk memprediksi keluaran dari sistem sebenarnya dari informasi masukan keluaran sebelumnya. Model dinamik sangat penting dalam merepresentasikan suatu sistem di mana eksperimen secara langsung sangatlah mahal, berbahaya, sulit dilakukan, dan sering menjadi tidak mungkin dikarenakan dapat mengganggu jalannya operasi di lapangan. Oleh sebab itu muncul setidaknya dua metode pendekatan yang digunakan untuk membangun model persamaan sistem dinamik, yaitu pemodelan secara fisis/teoritis di mana melibatkan penggunaan persamaan-persamaan dasar: fisika, kimia, matematika, mekanika, dan sebagainya yang seringkali mengalami kesulitan dalam hal kompleksitas, dan keakuratan yang juga akan menyebabkan kesulitan dalam hal perancangan. Pendekatan yang kedua adalah pendekatan secara eksperimental/identifikasi berdasarkan pada data pengukuran untuk mendapatkan model dinamik suatu sistem. Di samping itu, juga digunakan untuk menjelaskan penentuan struktur model dari pengumpulan data proses secara empiris.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa model *Nonlinear Auto Regressive with eXogeneous input (NARX)* seringkali digunakan dalam banyak metode sistem identifikasi untuk dinamika sistem non linier di mana bentuk

umumnya dapat dilihat pada persamaan (1). Dilakukan pendekatan sistem *multi input single output (MISO)* dalam memodelkan level di *HP drum* di mana sebagai pengidentifikasi (*identifier*) adalah konfigurasi dari tiga masukan satu keluaran sistem sebagaimana disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Sistem *MISO* Dengan Tiga Masukan Satu Keluaran

Variabel x_1 , dan x_2 merupakan variabel masukan proses dari sistem *HP drum* masing-masing berupa *flow BFW*, dan *steam product flow*. Variabel $y(k)$, dan $y(k-1)$ masing-masing merupakan variabel keluaran proses berupa level *water* di *HP drum* pada saat k dan $k-1$. Data-data variabel proses tersebut diambil dari *Plant Historical Data* dari DCS di PT Petrokimia Gresik di mana secara detil dapat disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel Masukan dan Keluaran Proses

Variabel	Tag number	Keterangan
$x_1(k-1)$	FC.22220	<i>Flow BFW</i>
$x_2(k-1)$	FC.22221	<i>Steam Product Flow</i>
$y(k-1)$	LC.22220	Level air di <i>HP drum</i> pada saat $k-1$ sebagai masukan model
$y(k)$	LC.22220	Level air di <i>HP drum</i> pada saat k sebagai keluaran model

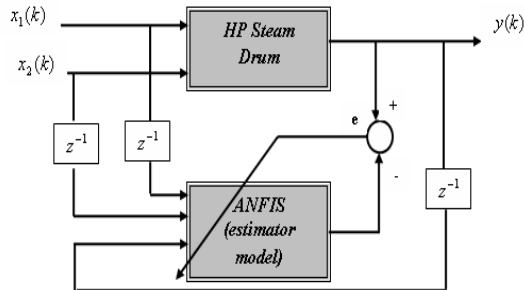
Berdasarkan hal tersebut di atas, maka sebagai vektor masukan pengidentifikasi dari keluaran model adalah:

$$\bar{x} = [x_1(k-1), x_2(k-1), y(k-1)] \quad (14)$$

Pendekatan model *Nonlinear Auto Regressive with eXogeneous input (NARX)* dalam hal ini diasumsikan bahwa proses *plant* berorde satu ($n=1$) dengan tidak ada estimasi terhadap waktu tunda, sehingga model proses dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

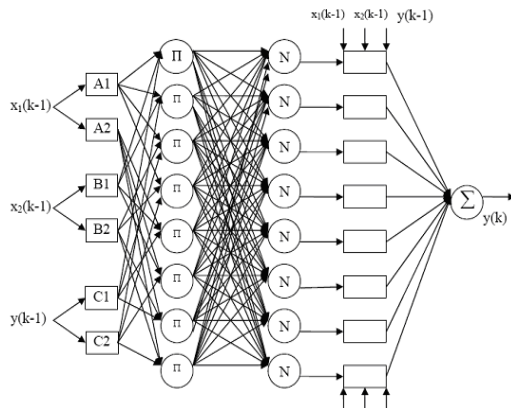
$$y(k) = \hat{F}(y(k-1), x_1(k-1), x_2(k-1)) + e(k) \quad (15)$$

Adapun *ANFIS* sebagai estimator model yang digunakan untuk pemodelan level air di *HP drum* dapat disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. *ANFIS* Sebagai Estimator Model

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa terdapat 3 masukan dan 1 keluaran pada model *neuro fuzzy*, sehingga keseluruhan struktur model yang digunakan dapat disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Struktur Model *ANFIS* Dengan Tiga Masukan dan Satu Keluaran

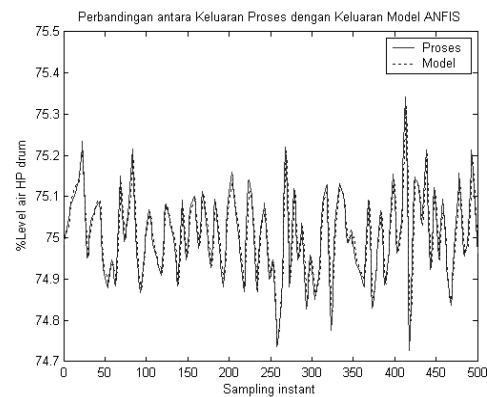
Simulasi Pemodelan Sistem *HP Steam Drum*

Simulasi pemodelan (*modelling*) dengan pendekatan *ANFIS* dimaksudkan untuk menganalisis, dan mengevaluasi metode pendekatan berbasis *neuro fuzzy* tipe *TSK* orde satu. Beberapa parameter awal yang telah ditentukan terlebih dahulu untuk prosedur pemodelan berbasis *neuro fuzzy* antara lain:

- Sistem inferensi *fuzzy*: *TSK* orde Satu;
- Jumlah *epoch*: 50;
- Jumlah fungsi keanggotaan setiap masukan : 2;
- Fungsi keanggotaan yang digunakan: *gbell*;
- Jumlah data pelatihan: 500;
- Jumlah data uji: 500;

- Konstanta pembelajaran: 0,1;
- Step size decrease rate*: 0,9;
- Step size increase rate* : 1,1.

Hasil simulasi pemodelan dengan menggunakan 500 data pertama sebagai data pelatihan diperoleh bahwa keseluruhan struktur model *ANFIS* dengan tiga masukan satu keluaran sebagaimana disajikan pada Gambar 8 adalah bahwa jumlah *node* adalah 34, total jumlah parameter adalah 50 terbagi dalam parameter linier (konsekuensi), dan non linier (premis) berturut turut berjumlah 32, dan 18, dengan banyaknya aturan *fuzzy* adalah 8. Adapun hasil identifikasi disajikan pada Gambar 9. Besarnya *RMSE* pada akhir tahap pelatihan (*epoch* ke 50) adalah 0,0325.

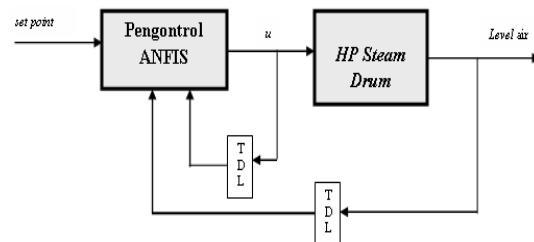


Gambar 9. Hasil Identifikasi Model Keluaran *ANFIS*

Perancangan dan Simulasi Pengontrol Level

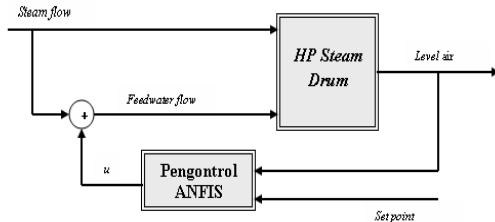
Pengontrol level merupakan salah satu bagian *loop* kontrol dalam konfigurasi *loop* kontrol *boiler* untuk menjaga level air pada drum dengan cara mengontrol laju aliran *boiler feed water (BFW)*. Konfigurasi rancangan pengontrol masih menggunakan skema seperti yang sudah terpasang, yakni *3/1 element level control*, kecuali pengontrolnya menggunakan pengontrol *ANFIS*.

Adapun blok diagram dari pengontrol *ANFIS* dapat disajikan pada Gambar 10.



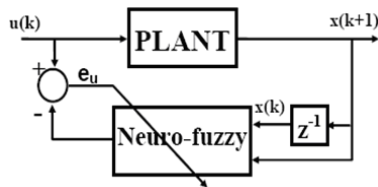
Gambar 10. Pengontrol *ANFIS*

Pada umumnya, sistem kontrol 3 elemen konvensional untuk pelatihan, dan simulasi dari pengontrol level air adalah seperti yang disajikan pada Gambar 11, di mana skema sistem kontrol yang digunakan adalah skema *feedforward* untuk *steam flow*.



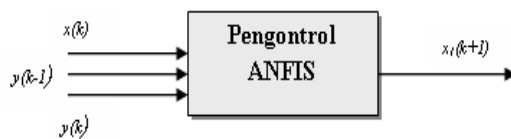
Gambar 11. Skema Umum Sistem Kontrol Tiga Elemen

Dengan demikian, pengontrol *neuro fuzzy* dengan metode *invers learning control* dengan mengacu pada blok diagram pada Gambar 11 dapat disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Proses Pembelajaran Sistem Neuro Fuzzy Untuk Pemodelan Invers Dinamika dari Plant

Permasalahan utama dalam perancangan pengontrol *neuro fuzzy* adalah akan ditentukannya aksi kontrol u sebagai fungsi dari keluaran *plant* x untuk mencapai *set point* yang diinginkan. Dalam penelitian ini akan digunakan metode *neuro fuzzy* dengan dinamika *inverse* sebagai pengontrol (*invers control*). Lebih lanjut, untuk membangun dan mensimulasikan pengontrol level air berbasis *neuro fuzzy* harus disesuaikan dengan *loop* kontrol yang ada, sehingga dalam hal ini terdapat 3 masukan, dan 1 keluaran dalam *invers* model yang diberikan, dan dijelaskan pada Gambar 13, dan Tabel 4.



Gambar 13. Pemodelan Invers Learning Control (Tiga Variabel Masukan dan Satu Variabel Keluaran)

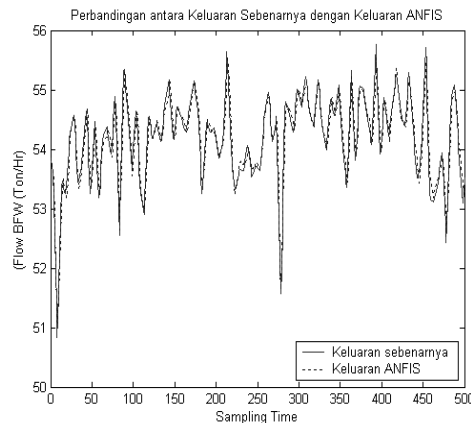
Tabel 4. Variabel Masukan dan Keluaran Model Dinamika *Invers*

Variabel	Tag Number	Keterangan
$y(k)$	LC22220.PV	% level <i>HP steam drum</i>
$y(k-1)$	LC22220.PV	% level <i>HP steam drum (k-1)</i>
$x(k)$	FC22220.PV	<i>Flow BFW (k)</i>
$x_1(k+1)$	FC22220.PV	<i>Flow BFW (k+1)</i>

Metode pemodelan yang digunakan adalah metode *ANFIS* seperti pemodelan level air pada *HP steam drum* dengan tiga masukan dan satu keluaran pada struktur model *ANFIS*-nya. Beberapa parameter yang telah ditentukan terlebih dahulu untuk prosedur *invers* model dinamik berbasis *neuro fuzzy* antara lain:

- Sistem inferensi *fuzzy*: TSK orde Satu;
- Jumlah *epoch*: 50;
- Jumlah fungsi keanggotaan setiap masukan : 3;
- Fungsi keanggotaan yang digunakan: *gbell*;
- Jumlah data pelatihan: 500;
- Jumlah data uji: 500;
- Konstanta pembelajaran: 0,1;
- Step size decrease rate*: 0,9;
- Step size increase rate* : 1,1.

Hasil model dinamika *invers* sampai dengan iterasi ke-50 berturut-turut dapat disajikan pada Gambar 14.

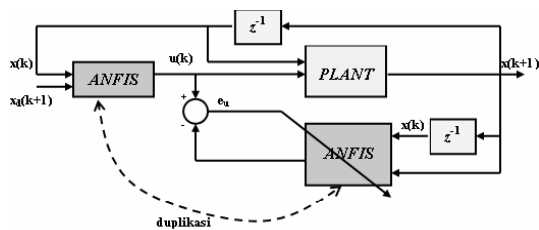


Gambar 14. Hasil Model Dinamika *Invers*

Dari hasil model dinamika *invers* pada Gambar 14 menunjukkan bahwa nilai *RMSE* sampai dengan *epoch* ke-50 sebesar 0,1857 yang nilainya relatif kecil, sehingga model dinamika *invers* dari *plant* dapat diterima sebagai model *invers* untuk keperluan perancangan pengontrol level air pada sistem *WHB*.

Hasil Simulasi dan Analisis

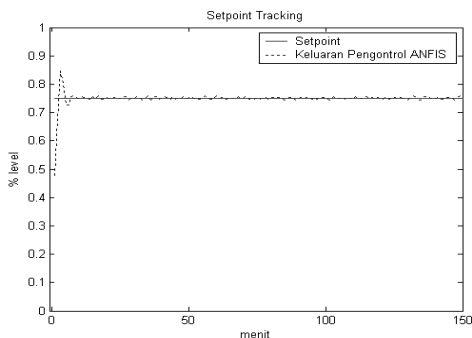
Berdasarkan pada proses pembelajaran yang diimplementasikan secara *off-line* dari pasangan data masukan, dan keluaran dari *plant*, maka model dinamika *invers* dari *plant* tersebut telah diperoleh. Tujuan dari pengontrol dalam hal ini adalah agar dapat mengikuti *set point tracking*, dan menyelidiki lebih lanjut sifat-sifatnya apabila terjadi perubahan dinamika *plant*. Simulasi dibedakan dalam dua kondisi yaitu pada kedudukan *set point* level air konstan sebesar 75% dengan waktu cacah 1 menit, serta pada saat *set point* diubah pada kondisi dari 50 menuju 75%. Adapun blok diagram aplikasi pengontrol *neuro fuzzy* dengan dinamika *invers plant* disajikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Pengontrol Neuro Fuzzy Dengan Metode Dinamika Invers

Hasil Simulasi Pada Saat Tidak Terjadi Perubahan Set Point

Hasil simulasi dengan menggunakan algoritma kontrol ANFIS untuk kondisi *set point* tetap pada kondisi 75% level air disajikan pada Gambar 16.

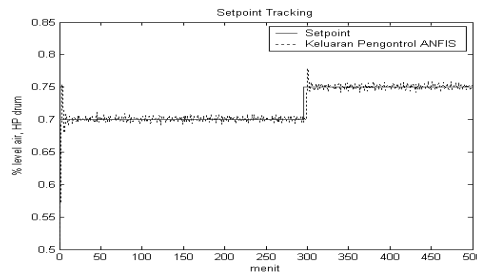


Gambar 16. Hasil Simulasi Pada Set Point 75% Konstan

Dari Gambar 16 dapat dianalisis bahwa pengontrol ANFIS dapat bekerja dengan baik apabila diberikan *set point* konstan yaitu pada kondisi 75% level air. Hal ini disajikan pada respons transiennya di mana *overshoot* yang timbul tidak terlalu tinggi yaitu sekitar 13% serta waktu untuk mencapai kondisi *steady state* tidak terlalu panjang yaitu 7 menit.

Hasil Simulasi Apabila Terjadi Perubahan Set Point

Hasil simulasi dengan menggunakan algoritma kontrol ANFIS untuk kondisi *set point* berubah dari 70 ke nilai 75% level air disajikan pada Gambar 17.



Gambar 17. Hasil Simulasi Perubahan Set Point dari 70 ke 75% Level Air

Berdasarkan hasil simulasi keluaran sinyal kontrol ANFIS untuk 500 data pertama yang disajikan pada Gambar 17, maka pengontrol ANFIS dapat mengikuti perubahan *set point* yang diberikan, walaupun masih terdapat *error* di titik balik grafik. Hal ini disebabkan karena kecepatan kemampuan pembelajaran, dan adaptasi dari ANFIS. Oleh karena sifatnya yang cepat belajar, dan adaptif, maka adaptasi parameter ANFIS pun juga cepat dalam mengejar *set point* yaitu sekitar 6 menit dengan *overshoot* maksimum sebesar 7,7%. Adaptasi parameter yang terus berubah dapat dilihat dari dinamika sinyal kontrol dari pengontrol ANFIS.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan berkenaan dengan simulasi, dan pengujian, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan sistem berbasis pada *neuro fuzzy* dengan 3 masukan, 1 keluaran serta model dinamika *invers plant* pada *HP steam drum* dengan 3 masukan, 1 keluaran telah menunjukkan hasil yang cukup baik. Hal ini disajikan dari nilai *RMSE* masing-masing untuk setiap validasi model berturut-turut sebesar 0,0487, dan 0,1857;
2. Performansi pengontrol *neuro fuzzy* dalam kecepatan beradaptasi, dan kemampuan belajar cukup baik dalam mengejar *set point*. Hal ini disajikan dengan lamanya waktu mengikuti *set point* pada dua kondisi yaitu apabila *set point* tetap, dan apabila terjadi perubahan *set point*, di mana waktu

untuk mencapai kondisi *steady state*-nya berturut-turut sekitar 7 dan 6 menit dengan maksimum *overshoot* berturut-turut sebesar 13, dan 7,7%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Standard Fasel Lantjes, *Waste Heat Boiler*, Hlm. 1-20, PT. Petrokimia, Gresik, 1992
- [2] Jang, J. S. R., Sun, C. T., dan Mizutani, E., *Neuro – Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligent*, Prentice-Hall, International Edition, New Jersey, 1997
- [3] Jan, J. R. dan Sun, C. T., *Neuro Fuzzy Modelling and Control*, Vol. 83, No. 3, Hlm. 1-29, The Proceeding of the IEEE International Conference on Control Application, 2005
- [4] Nazaruddin, Y. Y., Joko W, dan Hadisupadmo, S. A., *Inverse Learning Control Using Neuro Fuzzy Approach for a Process Mini Plant*, International Conference on Physics and Control, Moskow, 2003
- [5] Sudarto, *Identifikasi Nonlinier Plant Amoniak Menggunakan Metoda Neuro Fuzzy dan Wavenet*, Hlm. 3-50, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2004